

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221014001

# 海洋平台桩腿周围局部冲刷及其对基础承载力的影响\*

范庆来<sup>1</sup>, 马思琪<sup>1</sup>, 陈箫笛<sup>1</sup>, 赵海涛<sup>2</sup>, 樊 鸽<sup>1</sup>

(1. 鲁东大学海洋土木工程技术研究中心, 山东 烟台 264025;

2. 浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 在海洋平台桩靴基础安装施工过程中, 容易发生穿透现象而导致破坏。业界建议可通过在桩靴周边加设向上的袖结构来抑制贯入时周围土体的回流, 从而缓解穿透破坏。但这种袖结构的存在会导致局部冲刷, 形成的冲刷坑会减小桩靴有效埋深, 进而影响其使用期的承载力。通过一系列水槽试验, 探讨了不同形式桩腿的面积比、开孔率、来流角度等因素对于冲刷坑形状的影响, 进而开展了考虑冲刷坑影响的桩靴基础承载力数值计算, 并与忽略最大冲刷深度以上土体的传统模型、假设冲刷坑为倒圆台状的简化模型计算结果进行了对比。主要研究结果如下: (1) 加设圆形袖结构的桩腿引起的冲刷深度要比方形袖结构桩腿小, 建议工程中采用面积比较小的圆形袖结构来缓解穿透破坏; (2) 桩腿的面积比、开孔率、来流角度等因素对冲刷坑形状都存在影响。最大冲刷深度随着开孔率的增大而减小, 当开孔率较大时, 冲刷现象近似于群桩冲刷, 出现随着冲刷角度的增大冲刷深度先增大后减小的现象; (3) 当考虑冲刷坑对于桩靴承载力的影响时, 简化模型能够合理反映冲刷坑对于桩靴基础承载力的影响。

**关键词:** 桩靴基础; 水槽试验; 冲刷坑; 数值模拟; 承载力

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1246-09

## Local Scour Around Pile Leg of Offshore Platform and Its Influence on Foundation Bearing Capacity

FAN Qinglai<sup>1</sup>, MA Siqi<sup>1</sup>, CHEN Xiaodi<sup>1</sup>, ZHAO Haitao<sup>2</sup>, FAN Ge<sup>1</sup>

(1. Center for Marine Civil Engineering Technology, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** During the installation and construction of spudcan foundations of offshore platforms, it is easy to cause damage due to penetration phenomena. It is suggested by the industry that an upward sleeve structure can be added around the pile shoe to suppress the backflow of the surrounding soil during penetration, so as to alleviate penetration damage. However, the presence of such sleeve structure will lead to local scour, and the scour pit formed will reduce the effective burial depth of the spudcan foundation, thus affecting its bearing capacity during its service life. A series of flume tests were con-

\* 收稿日期: 2022-10-14; 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE010)、烟台市科技创新发展计划项目(2021XDHZ071)资助

作者简介: 范庆来(1977—), 男, 教授, 博士后。主要从事海洋岩土工程、原位测试技术等方面的研究。

E-mail: fanqinglai@ldu.edu.cn

ducted to examine the influence of factors such as the area ratio of different pile legs, the opening rate, the inflow angle on the shape of the scour pit. Then, numerical calculations of the bearing capacity of the spudcan foundation considering the impact of the scour pit were conducted, and the results were compared with those derived from the traditional model neglecting the soil above the maximum scour depth, and those from the simplified model assuming that the scour pit is in the shape of an inverted cone. The main results are as follows: (1) The erosion depth caused by the pile leg with the circular sleeve structure is smaller than that of the square sleeve structure. It is suggested in the project to use the circular sleeve structure with a relatively small area ratio to alleviate the punch-through damage. (2) The area ratio of pile leg, and inflow angle affect the shape of scour pit. The maximum scour depth decreases with the increase of the opening rate. When the opening rate is large, the scour phenomenon is similar to that of pile group and the scour depth first increases and then decreases with the increase of the inflow angle. (3) The simplified model can reasonably reflect the impact of the scour pit on the bearing capacity of the spudcan foundation when considering the influence of scour pit.

**Keywords:** spudcan foundation; flume test; scour pit; numerical simulation; bearing capacity.

## 0 引言

自升式海上钻井平台目前被广泛应用在近海油气资源的开发活动中。自升式平台在结构上由上部钻井平台、升降装置和格构式桩腿三部分组成。该类型平台一般在桩腿底部设有直径为10~20 m的纺锤形桩靴。大量工程实践表明,在上砂下黏或上硬下软海床地基条件下,纺锤形桩靴基础很容易发生穿透破坏而引起整个平台失稳。国内外对于桩靴穿透破坏机制已经开展了系统的模型试验和数值模拟<sup>[1-5]</sup>,但这些研究一般都只关注桩靴的具体形状及尺寸,而忽视了桩腿形式的影响。最近,Y.P.Li等<sup>[6]</sup>通过离心试验和大变形有限元计算研究了格构式桩腿的面积比和开孔率对桩靴基础贯入过程的影响,结果表明考虑格构腿的情况下,桩靴贯入后顶部孔洞深度有明显增大。Y.P.Li等<sup>[7]</sup>进一步建议可通过在桩靴周边加设向上的袖结构来抑制贯入时周围土体的回流,从而缓解穿透破坏。但这种袖结构的存在可能会引起局部冲刷,由于底部桩靴埋置在土体中,而上部桩腿部分处在海水中,因此上部桩腿部分会改变周围水体流场,桩腿对水流的挤压导致桩周流速加快,随水流的扬动是随机的,泥沙从静止状态扬起直到流速变小时沉积到后方,会产生冲刷现象并形成冲刷坑,扬起的泥沙逐渐沉积到桩柱后方,形成沙丘。形成的冲刷坑会减小桩靴有效埋深,进而影响其使用期的承载力。

目前,对于桩柱的冲刷许多学者做了较为系统的研究,在冲刷平衡方面,国内外学者研究了水流流速、泥沙粒径、水深、桩径大小、群桩布置等不同因素对冲刷坑深度的影响<sup>[8-11]</sup>。为了评价冲刷对于基础承载力的影响,工程中传统方法是认为冲刷最深处以上土体全部冲走,这种传统方法虽然方便计算,但是过于保守。一些学者建议在数值计算中采用倒圆台状或倒圆锥状简化冲刷坑模型来分析冲刷对于基础承载力的影响<sup>[12]</sup>,但是与实际冲刷下的承载力是否吻合尚缺乏足够的验证。因此本文通过一系列水槽试验,探讨了不同形式桩腿的面积比、开孔率、来流角度等因素对于冲刷坑形状的影响,进而开展了考虑冲刷坑影响的桩靴基础承载力数值计算,并与忽略最大冲刷深度以上土体的传统模型、假设冲刷坑为倒圆台状的简化模型计算结果进行了对比,可为实际工程提供一些参考。

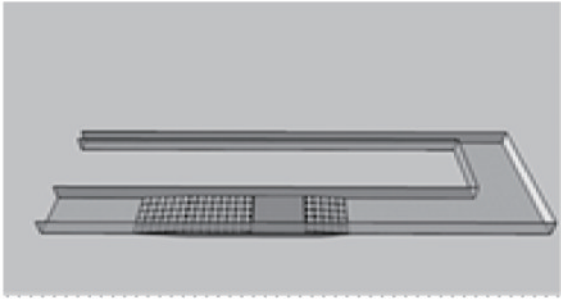
## 1 桩腿局部冲刷试验

### 1.1 试验水槽

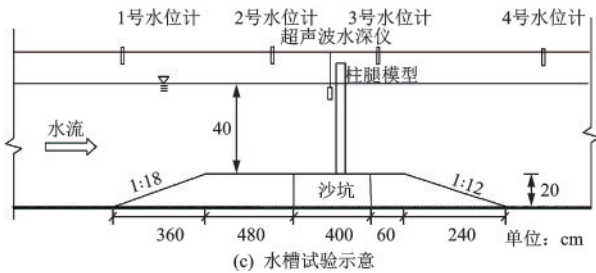
试验是在浙江水利水电学院海塘结构安全与健康试验室的多功能水槽中进行,该水槽分为U型的宽段、窄段和连接段。在试验中综合考虑选择模型比尺1:30,试验在宽段进行,尺寸为长32 m,宽3 m,高1 m;砂槽的尺寸为4 m×3 m×0.2 m,水槽的上游有1:18的缓坡,下游有1:12的缓坡,试验水槽如图1所示。



(a) 水槽现场图片



(b) 水槽简化示意



(c) 水槽试验示意

图1 多功能试验水槽

Fig.1 Multifunctional water flume

## 1.2 试验用沙

本次试验采用的是均匀流,模拟原型桩腿直径6 m,桩靴最大直径为9 m,工作水深为12 m,流速为1.5 m/s,泥沙粒径为0.02 mm,其中泥沙颗粒起动流速 $U_c$ 的计算采用能够适用于各种粒径大小的宾国仁公式<sup>[13]</sup>,表达式如式(1)所示:

$$U_c = \sqrt{gD} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \left( 6.25 + 41.6 \frac{h}{H_a} \right) + \left( 111 + 740 \frac{h}{H_a} \right) \frac{H_a \delta_0}{D^2}} \quad (1)$$

式中, $U_c$ 为颗粒起动流速; $g$ 为重力加速度; $D$ 为泥沙粒径,在本文计算中取中值粒径 $d_{50}$ ; $\gamma_s$ 为泥沙的容重; $\gamma$ 为水的容重; $h$ 为水深; $H_a=10$  m,为以水柱高表示的大气压力; $\delta_0=(3.0 \times 10^{-8})$  cm,为水分

子厚度。

选择几何比尺为1:30,根据重力相似准则,泥沙粒径的选取需要考虑泥沙起动流速相似,速度之间的比尺为 $1 : \sqrt{30}$ ,试验采用天然砂,中值粒径 $d_{50}=0.29$  mm,不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}=2.75$ ,泥沙密度 $\rho=2650$  kg/m<sup>3</sup>,自然休止角为33°,试验沙的起动流速为0.227 m/s。

## 1.3 试验模型

根据水槽条件,综合考虑几何比尺和重力相似准则,试验模型各物理量相似常数见表1。

表1 各物理量相似常数

Table 1 The similarity constants for physical quantity

物理量名称	原型	模型	比尺
水深 $L$ /m	12	0.4	30
流速 $v$ /(m·s <sup>-1</sup> )	1.5	0.274	$\sqrt{30}$
泥沙粒径 $d$ /mm	0.02	0.29	—
起动流速 $U_c$ /(m·s <sup>-1</sup> )	1.219	0.227	近似于 $\sqrt{30}$
时间 $T$ /h	54.8	10	$\sqrt{30}$

现有的海洋平台工程中,桩腿一般为方形格构腿,如图2(d)、(e)所示。当在桩靴周边加设向上的袖结构时,方形格构腿被袖结构所包围,因此在冲刷试验中可以直接将桩腿做成圆柱或方形柱,如图2(a)、(b)和(c)所示。本研究制作如下5种模型,如图2所示。

圆柱桩腿模型(a)、(b)直径分别为30 cm和20 cm,方形桩腿模型(c)边长为20 cm,方形格构腿模型(d)和(e)的格构空隙分别为边长10 cm和15 cm的正方形模型,如图3所示。

## 1.4 试验设计

### 1.4.1 试验参数设置

试验主要研究面积比、开孔率、来流方向三个参数:

(1)面积比 $A_a$ :

$$A_a = A_1/A_2$$

式中, $A_1$ 是指桩腿的横截面积; $A_2$ 是指桩靴最大截面积,如图4所示。

(2)开孔率 $e$ :

$$e = S_1/S_2$$

式中, $S_1$ 是指桩腿开孔的总面积; $S_2$ 是指桩腿侧面的总面积,在实际工程中桩腿大多为格构状,支撑之间

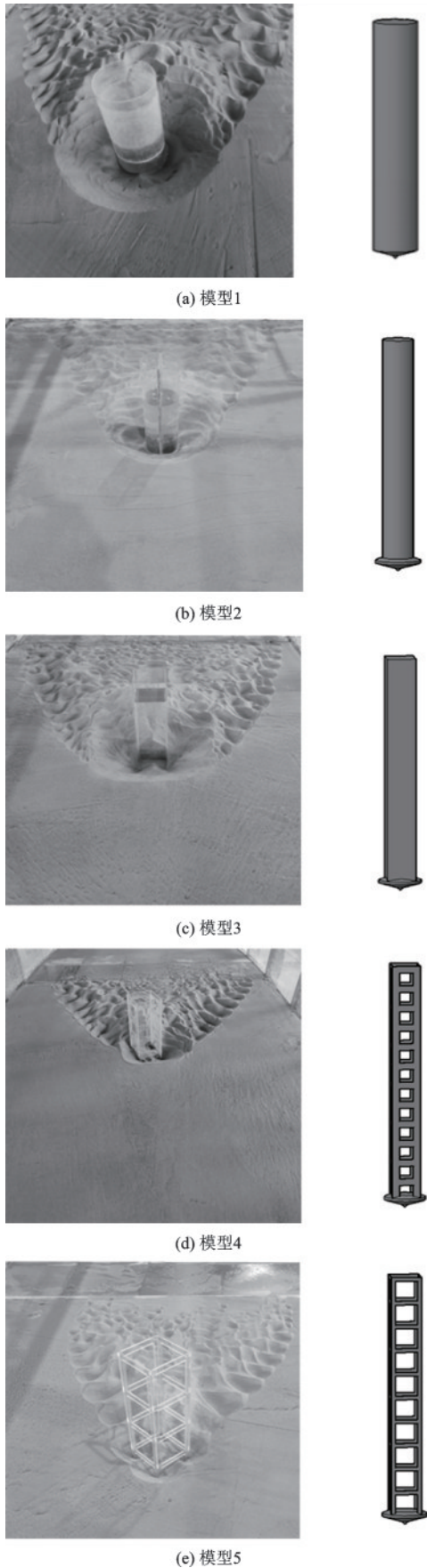


图2 模型试验图和示意图

Fig.2 Model trial diagram and schematic diagram

的排列方式也是多种多样的,使用开孔率可以较为合理的表征这一参数,如图4所示。通过改变开孔正方形的边长 $d$ ,改变开孔率 $e$ ,二者的对应关系见表3。

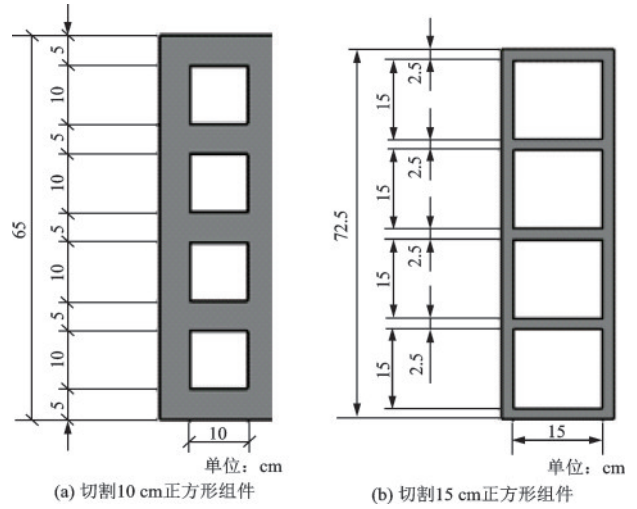


图3 模型组件示意

Fig.3 Schematic diagram of the model components

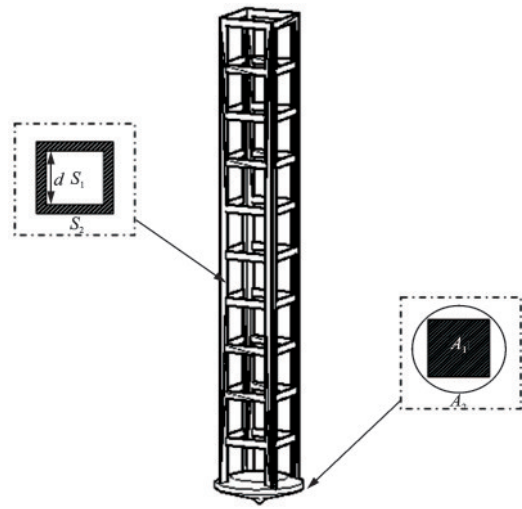


图4 模型示意

Fig.4 Schematic representation of the model

表2 桩腿形状和桩腿面积比 $A_2$ 对应关系

Table 2 Corresponding relation between the pile leg shape and the pile leg area ratio

设计参数	20 cm 圆柱	20 cm 方柱	30 cm 圆柱
	桩腿	桩腿	桩腿
桩腿横截面积/cm <sup>2</sup>	314	400	706.5
桩靴最大截面积/cm <sup>2</sup>	706.5	706.5	706.5
面积比	0.44	0.57	1

表3  $d$ 和 $e$ 的对应关系

Table 3 The corresponding relationship between  $d$  and  $e$

$d / \text{cm}$	0	10	15
$e / \%$	0	33	64

(3)来流方向  $\alpha$

考虑三种不同的来流方向,分别为 $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ 和 $45^\circ$ 来分析冲刷影响,如图5所示。

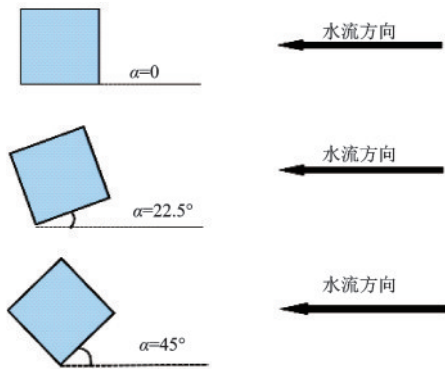


图5 来流角度示意

Fig.5 Schematic illustration of the flow angle

1.4.2 试验工况

水槽试验中主要考虑了面积比、开孔率、来流方向 $\alpha$ 三个参数,设计了11种工况,试验工况见表4。工况1与工况2分别使用的模型(a)、(b),主要用于分析不同面积比的影响;工况3、4、5为模型(c)分别在 $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 来流方向的影响;工况6、7、8为模型(d)分别在 $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 来流方向的影响;工况9、10、11为模型(e)分别在 $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 来流方向的影响。

表4 试验工况

Table 4 Experimental conditions

工况编号	桩柱形状	开孔边长 $d/\text{cm}$	面积比 $A_a$	开孔率 $e/\%$	来流方向 $\alpha/(\circ)$
工况1	圆柱	0	1	0	—
工况2	圆柱	0	0.44	0	—
工况3	方柱	0	0.57	0	0
工况4	方柱	0	0.57	0	22.5
工况5	方柱	0	0.57	0	45
工况6	方柱	10	0.57	33	0
工况7	方柱	10	0.57	33	22.5
工况8	方柱	10	0.57	33	45
工况9	方柱	15	0.57	64	0
工况10	方柱	15	0.57	64	22.5
工况11	方柱	15	0.57	64	45

在冲刷期间使用超声地形传感器来检测冲刷随时间的变化,进而得到冲刷深度与时间之间的冲刷历程曲线,如图6所示。冲刷结束后使用激光地形传感器采集冲刷深度的数据,并使用surfer软件得出地形图,如图7所示。

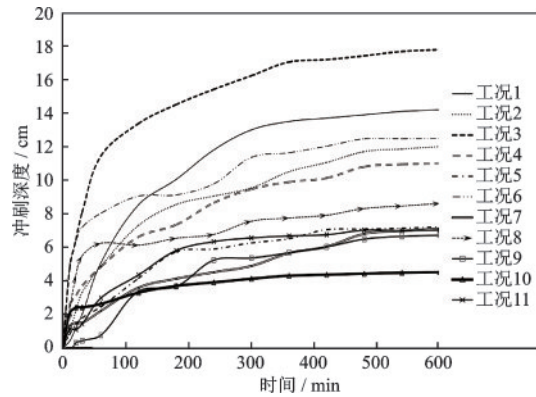


图6 历程曲线

Fig.6 Progress curve

从冲刷的历程曲线中可以看出,在冲刷的前期斜率较大,此时冲刷变化较为明显,随着时间的变化冲刷深度变化不再明显,统一将冲刷时间定为10 h,从图6历程曲线中可以看出,在开始冲刷之后的2~3 h内,桩前的冲刷深度达到最大冲刷深度的80%~90%,10 h后曲线趋于平衡,冲刷深度趋于稳定,桩柱底部沙层受到水流冲刷运输到下游,经过一段时间后冲刷现象不明显,接近于冲刷平衡<sup>[8-11]</sup>。从图6中可以看到,用来反映袖结构影响的工况3,即方形袖结构,冲刷深度最大,要大于圆形袖结构工况1和2,由此对比可看出圆形袖结构缓解穿透破坏效果更好。

在分析冲刷坑的形态时可发现桩前类似倒置的圆台,桩后冲刷现象相对较小,因此主要关注桩前最大冲刷深度、位置以及冲刷坑的长度和宽度,见表5。

(1)最大冲刷深度

在冲刷坑的形状参数<sup>[14]</sup>中,冲刷深度越大代表冲刷的影响越大。从表5中可以看出随着开孔率的增大最大冲刷深度减小,这主要是由于开孔率越大,阻水断面越小。对比工况1和工况2两种圆形桩腿,在开孔率相同(都为0)时,最大冲刷深度随着面积比的增大而增大。在分析方形桩腿与水流的夹角时,可看出在开孔率为0%和33%时随着角度的增大冲刷深度减小,是由于随着角度的增大,水流从正面撞击桩腿到由前方棱角处发生导流,对水流的阻碍作用逐渐减小。但在开孔率为64%时,由于开孔率较大,每个棱角处更像单独的

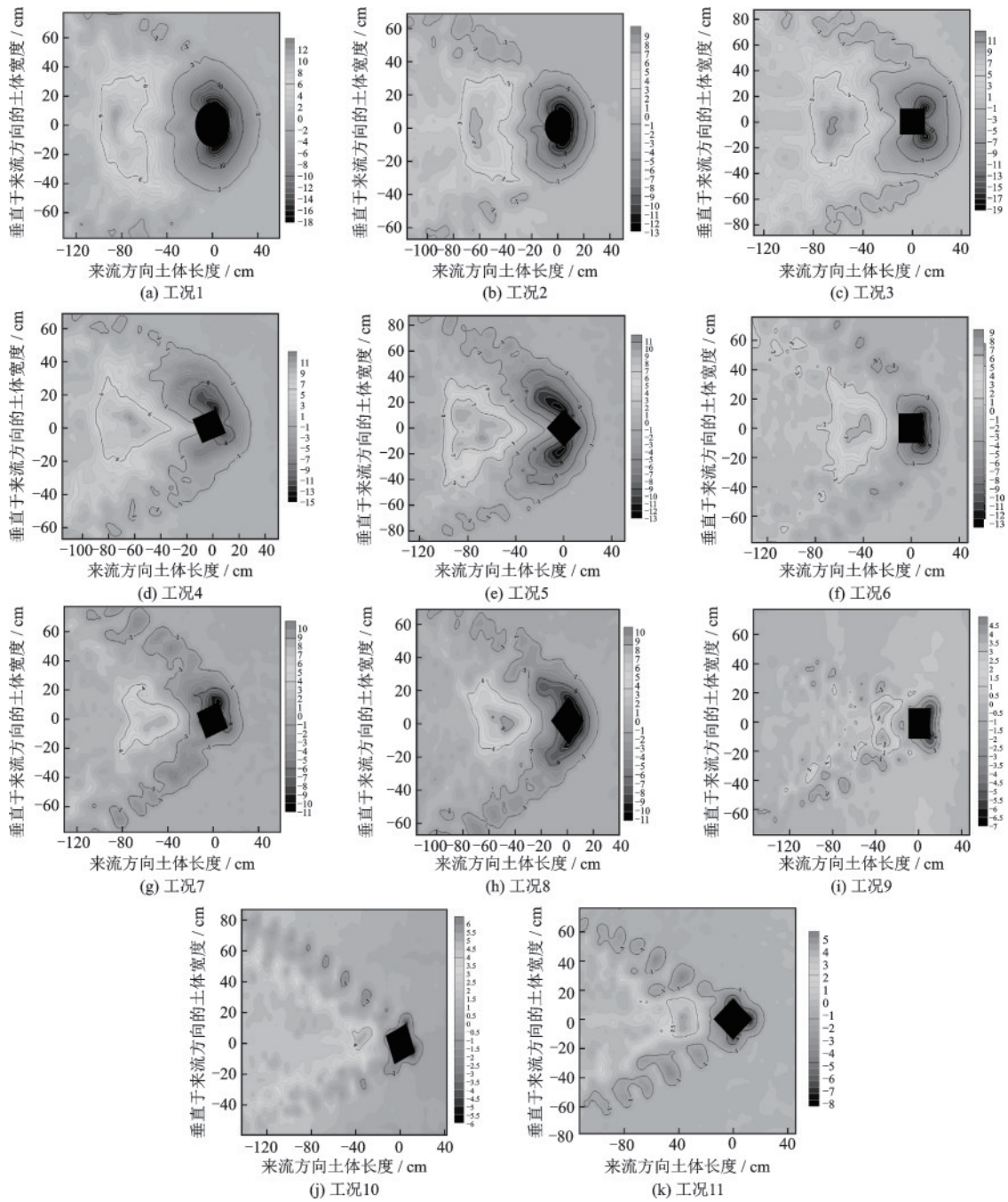


图7 地形图

Fig.7 Topographic maps

桩腿,近似于群桩冲刷,从而出现随着角度的增大冲刷深度先减小后增大的现象。

(2)最大冲刷深度位置

从表5中工况1和工况2两个圆柱桩腿的冲刷中,最大冲刷深度的位置为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。在方形桩腿与冲刷角度为 $0^{\circ}$ 的工况3、6、9中可看出最大冲刷深度在桩前 $45^{\circ}$ 附近,这是由于桩正面阻碍水流,进而挤压水流从桩侧流过,桩侧成直角,导流作用小,因此在 $45^{\circ}$ 附近流速较大,将泥沙扬起并输送到下流,

造成此处冲刷深度较大;从工况4、7、10中可以看出,与水流夹角成 $22.5^{\circ}$ 时,冲刷深度最大处也在方形桩腿的棱角处,且均在水流的上侧。工况4和工况7最大冲刷处与工况10的不同是因为工况10的开孔率较大,更倾向于群桩基础,由于前桩的掩蔽作用导致后桩的冲刷深度减小。而工况4和工况7由于开孔率较小,对水流的阻碍作用较大,将前方水流大部分挤压在迎水面大的一侧,进而转角处流速较大,携带起的泥沙更多,冲刷深度最大;工况5、

8、11也是如此,工况 11 由于开孔率较大,趋向于群桩冲刷,因此前方的冲刷深度较大,由于工况 5 和工况 8 中桩腿对前方水流的阻碍作用较大和两侧水流的挤压导致转角处流速较大,因此冲刷深度较大。

(3)冲刷坑的长度、宽度

从表 5 中可以看出在圆形桩腿中工况 1 和工况 2 冲刷坑的长度和宽度,在开孔率相同的情况下,随着面积比的增大而增大;在工况 3~11 中可以看出,随着开孔率的增大,冲刷坑的长度和宽度减小,在相同的水流夹角中,随着开孔率的增大冲刷坑的长度和宽度减小。

(4)桩与沙丘的距离、沙丘的高度、沙丘的长度、沙丘的宽度

由于冲刷时将桩周附近的泥沙输移到后方,后方流速较小进而形成沙丘,当桩腿相对于来流方向呈对称状时,沙丘一般在桩柱迎流的正后方形成,但由于不同的来流角度,桩柱附近的泥沙冲刷程度不同,因此导致后方的沙丘位置偏移。后方沙丘近似看作圆锥,采集沙丘的高度、长度和宽度,并且由于开孔率的不同,桩周附近的流场也不同,导致后方沙丘形成的位置也不同。见表 5,在圆形桩腿中,工况 1 和工况 2 桩与沙丘的距离、高度、长度、宽度在开孔率相同的情况下,随着面积比的增大而增大。在工况 3~11 中可以看出,随着开孔率的增大桩与沙丘的距离、高度、长度、宽度减小,在相同的开孔率中,来流方向改变与后方沙丘形态规律并不明显。

表 5 各工况冲刷坑、沙丘特征

Table 5 Characteristics of scouring pits and sand dunes under different conditions

工况编号	最大冲刷深度/cm	最大冲刷深度位置/(°)	冲刷坑长度/cm	冲刷坑宽度/cm	桩与沙丘距离/cm	沙丘高度/cm	沙丘长度/cm	沙丘宽度/cm
工况 1	16.9	55	46	100	85	12	69	107
工况 2	12.8	37	30	70	63	7.8	50	70
工况 3	18.2	48	44	97	65	11.3	80	113
工况 4	14	295	35	106	62	11.5	90	120
工况 5	12.6	97	31	97	68	10.6	86	100
工况 6	12.6	46	31	63	38	8.1	76	80
工况 7	10.9	292	28	58	43	8.6	64	90
工况 8	10.7	90	30	70	52	9.6	80	76
工况 9	6.8	41	20	41	34	4.3	36	44
工况 10	5.8	25	21	44	35	5.2	46	39
工况 11	7.8	8	24	46	37	5.1	35	35

## 2 考虑冲刷坑影响的基础承载力计算

为了分析冲刷坑对于使用期桩靴基础承载力的影响,本文按照几何比尺 1:30 将物理模型试验得到的冲刷坑调整为实际尺寸,然后将得到的冲刷坑数据通过建模导入到 ABAQUS 软件中进行数值模拟。圆形袖结构引起的冲刷深度相对较小,圆柱形桩腿应用范围广,简化模型实用性强。在埋深较浅时考虑冲刷影响,由物理模型实验结果证实了,桩径面积比较小时,冲刷深度相对较小,承载力相对较大,因此数值模型选取桩径面积比小的圆柱形桩腿工况 2 进行比较。按照图 8 确定冲刷坑的简化形式, $S_d$ 、 $\varphi$ 、 $S_{tw}$ 、 $S_{bw}$  分别代表冲

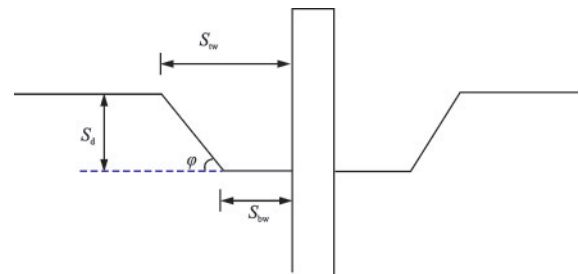


图 8 冲刷坑示意

Fig.8 Schematic diagram of the scouring pit

刷坑深度、冲刷坑坡脚、冲刷坑顶部宽度、冲刷坑底部宽度<sup>[12]</sup>。

根据工况 2 冲刷后的地形图、表 5 物理实验数据可知,最大冲刷深度 12.8 cm、冲刷坑长度 30 cm、冲刷坑宽度 70 cm、桩与沙丘距离 63 cm、沙丘高度

7.8 cm、沙丘长度 50 cm、沙丘宽度 70 cm。按照几何比尺 1:30 调整为实际尺寸冲刷坑数据以此确定数值模型冲刷坑尺寸。桩腿前方冲刷类似倒置的半圆台,以桩腿截面为圆台顶面,即取  $S_{bw}=0$ ,以冲刷坑长度为底面半径,圆台的高度为冲刷坑最大冲刷深度。另外,单向冲刷会在桩后一定位置形成淤积土丘,本文假设桩腿后方淤积沙丘为圆锥体,圆锥的高度为最大淤积高度,圆锥底面半径为沙丘的长度。为了更系统考虑冲刷坑的影响,本文比较了两种简化模型。简化模型 I:将冲刷坑简化为倒置的圆台,以桩前冲刷坑长度为圆台底部半径,桩腿半径为圆台顶部半径,圆台的高度取冲刷坑最大冲刷深度,如图 9(a)所示。简化模型 II:在简化模型 I 的基础上添加后方沙丘,将沙丘简化为圆锥,圆锥直径为沙丘长度,圆锥高度为土丘的最大淤积高度,圆锥底部圆心的位置在沿水流方向桩的正后方,距离为桩柱和正后方沙丘最高处之间的距离,如图 9(b)所示。

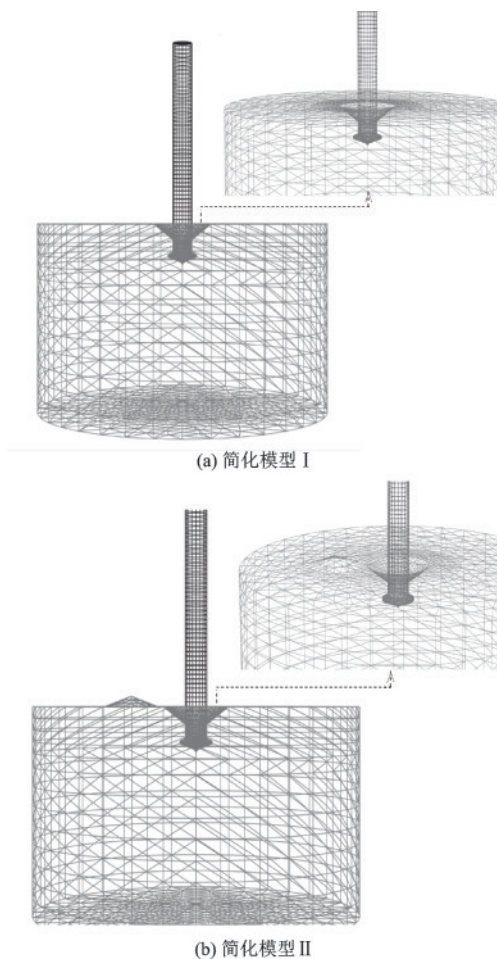


图 9 数值软件简化模型

Fig.9 Numerical software simplified model

在有限元模型中,土体网格直径取  $10 D$ ,高度取  $5 D$ 。土体模型侧面约束水平方向上的两个自由度,土体底部约束三个方向的自由度。由于实际冲刷坑形状比较复杂,土体模型采用十结点修正二次四面体单元(C3D10M)划分,桩靴基础采用离散单元(R3D4)来划分。土体采用基于 Mohr-Coulomb 破坏准则的理想弹塑性本构模型,土体容重  $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$ ,变形模量  $E=50 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu=0.4$ ,内摩擦角取为  $33^\circ$ ,黏聚力  $c=10 \text{ kPa}$ 。桩靴与土体之间的接触面采用摩擦接触对算法<sup>[15-17]</sup>,桩基与土体的界面摩擦系数取  $\mu=0.65$ 。有限元模型进行地应力平衡后<sup>[16]</sup>,采用位移控制方式对参考点施加荷载,参考点设置在桩靴最大截面中心处。为了保证计算精度同时增加效率,将桩靴基础附近土体局部加密网格,距离较远处划分网格适当稀疏。

以实际冲刷坑模型计算的承载力为实际值,以忽略最大冲刷深度以上土体的承载力为工程保守值,以未经冲刷测得的承载力为未冲刷值,以及简化模型 I 和简化模型 II 所受到的承载力进行对比分析。选取多个不同的埋深,分别为  $0.6 D$ 、 $1.2 D$ 、 $1.8 D$ ,如图 10 所示。

工程保守值在  $0.6 D \sim 1.8 D$  埋深中相较于实际值小了  $15\% \sim 20\%$ ,可见工程上采用忽略最大冲刷深度以上土体的传统方法偏于保守,将会引起工程成本的增加。从未冲刷值和实际值之间的比较来看,桩靴埋深  $0.6 D$  情况下考虑冲刷时的承载力值较未冲刷值降低  $24\%$  左右,桩靴埋深  $1.2 D$  情况下考虑冲刷时的承载力值较未冲刷值降低  $12\%$  左右,桩靴埋深  $1.8 D$  情况下考虑冲刷时的承载力值较未冲刷值降低  $9\%$  左右。可见随着埋深的增加,冲刷坑对承载力的影响逐渐降低,考虑冲刷时的承载力值较未冲刷值降低趋势减弱。桩靴埋深  $1.2 D$  较桩靴埋深  $0.6 D$  考虑冲刷时承载力提高  $76.5\%$ ,桩靴埋深  $1.8 D$  较桩靴埋深  $1.2 D$  考虑冲刷时承载力提高  $36.7\%$ ,随着埋深的增加,承载力显著提高,但增长趋势逐渐减弱。

简化模型 I 和 II 的计算结果除了在桩靴基础埋深较浅即  $h=0.6 D$  时略有差别,在埋深较大时两者几乎重合,并且与实际值相比差别不大,最大误差在  $4\%$  以内。考虑到模型复杂程度以及计算成本,建议工程中可以采用简化模型 I 来分析冲刷坑的影响。

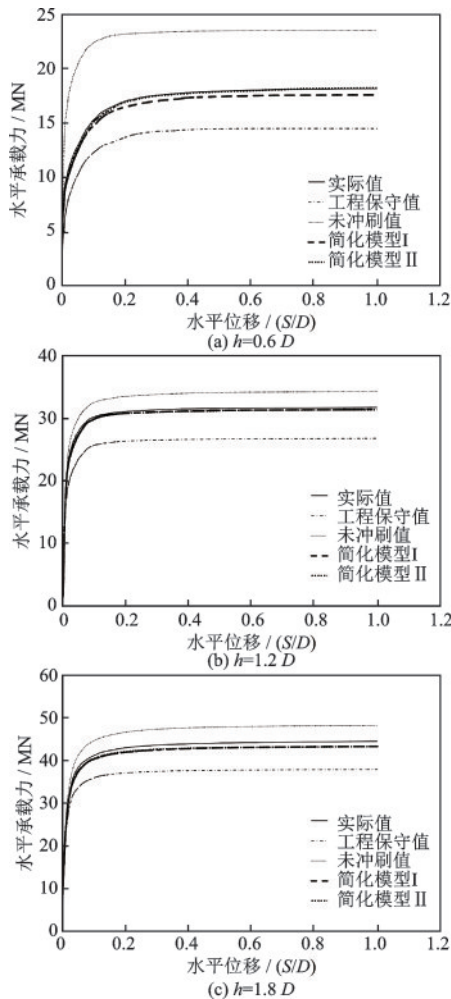


图10 不同埋深对水平承载力的影响

Fig.10 Effect of different burial depths on the horizontal bearing capacity

### 3 结论

(1)通过水槽冲刷试验结果可以看到,加设圆形袖结构的桩腿引起的冲刷深度要比方形袖结构桩腿小,因此工程中若采用袖结构来缓解穿透破坏,建议采用面积比较小的圆形袖结构。

(2)同形式桩腿的面积比、开孔率、来流角度等因素对于冲刷坑形状都有显著影响。最大冲刷深度随着开孔率的增大而减小,当开孔率较大时,冲刷现象近似于群桩冲刷,出现随着冲刷角度的增大冲刷深度先增大后减小的现象。

(3)工程中需要考虑冲刷坑对于桩靴承载力的影响,通过比较,可以看到假设冲刷坑为倒圆台状的简化模型能够合理反映冲刷坑对于桩靴基础承载力的影响。

### 参考文献:

- [1] 范庆来, 苏煜茹, 张炳磊. 双层地基中纺锤形桩靴基础贯入阻力及机理分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 452-459.  
Fan Q L, Su Y R, Zhang B L. Analyses of penetration resistance and mechanism of spudcan foundations in double-layered soil[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2): 452-459. (in Chinese)
- [2] 范庆来, 张炳磊, 贾小伟. 双层黏土地基方形桩靴贯入过程与穿透机制[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(1): 62-67.  
Fan Q L, Zhang B L, Jia X W. Analysis of penetration and punch-through failure of square spudcan in two-layered clays[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(1): 62-67. (in Chinese)
- [3] Zheng J, Hossain M S, Wang D. Numerical modelling of spudcan deep penetration in three-layer clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 15(6): 131-143.
- [4] Yin S, Yi J T. Undrained bearing capacity of deeply embedded skirted spudcan foundations under combined loading in soft clay[J]. Marine Structures, 2019, 66: 164-177.
- [5] Lee J M, Kim Y H, Hossain M S, et al. Mitigating punch-through on sand-over-clay using skirted foundations[J]. Ocean Engineering, 2020, 201: 1-16.
- [6] Li Y P, Yi J T, Lee F H, et al. Effects of the lattice leg on cavities and bearing capacity of deeply embedded spudcans in clay[J]. Géotechnique, 2016, 67(1): 1-17.
- [7] Li Y P, Liu Y, Lee F H, et al. Effect of sleeves and skirts on mitigating spudcan punch-through in sand overlying normally consolidated clay[J]. Géotechnique, 2019, 69(4): 283-296.
- [8] Sheppard D M, Odeh M, Glasser T. Large scale clear-water local pier scour experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130(10): 957-963.
- [9] Dahlberg R. Observations of scour around offshore structures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 20(4): 617-628.
- [10] 姜绍云, 李志刚, 段梦兰, 等. 波流作用下导管架平台桩基冲刷试验研究[J]. 石油机械, 2012, 40(9): 57-61.  
Jiang S Y, Li Z G, Duan M L, et al. Experimental study of the pile foundation scouring of jacket platform under the effect of wave and current[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(9): 57-61. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)

(下转第 1303 页)